

피드포워드 제어 방식을 적용한 승강압형 컨버터

°곽건희*, 서보혁*, 최병조**
 경북대학교 대학원 전기공학과*, 경북대학교 전자전기공학부**

Peak Voltage Feedforward Control of PWM Buck-boost Converter

°Gunhee Gwag*, Bohyeok Seo*, Byungcho Choi**,
 Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University*,
 School of Electric & Electrical Engineering, Kyungpook National University**

Abstract - DC and small-signal ac characteristics are examined for a pulse-width modulated (PWM) dc-dc buck-boost converter with a peak voltage modulation (PVM) feedforward control. Circuit model is used to derive an expression for the output voltage in terms of the input voltage and load resistance. Small-signal circuit model is used to derive the input-to-output voltage transfer function (audiosusceptibility).

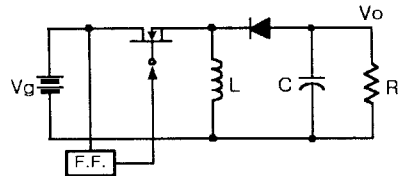


그림 1. 피드포워드 제어 방식 승강압형 컨버터

1. 서 론

전압 레귤레이터의 목적은 일정한 출력 전압을 계속적으로 유지시키는 것이다. Pulse-width modulated (PWM) dc-dc 컨버터를 개방 루프에서 동작시키면, DC 출력 전압은 출력 전류에는 독립적이지만, 입력 전압에는 비례하여 나타난다. 입력 전압에 대한 출력 전압 regulation을 위하여 피드백 제어 방식 대신에 피드포워드 제어 방식을 쓰는 것은 이미 여러 논문에서 논의된 바이다. [1]~[3]

피드포워드 제어 방식은 직접 입력의 변화를 감지하여 보상하기 때문에 광범위한 구역에서의 좋은 Line regulation을 얻을 수 있고, 피드백 제어 방식과는 달리 안정성 문제가 없기 때문에 간단한 구조의 제어기 설계가 가능하다. 또 출력 임피던스에 영향을 주지 않는다. 피드백 제어 방식과 피드포워드 제어 방식을 결합하여 제어기를 설계한다면 좋은 특성을 가진 컨버터를 설계할 수 있을 것이다.

최근에 피드포워드 제어 방식 승압형과 강압형 컨버터의 특성에 대한 연구 논문이 발표된 바 있다.[1] 본 논문에서는 피드포워드 최대 전압 변조(PVM, Peak Voltage Modulation) 제어 방식을 승강압형에 적용하여 DC 해석과 소신호 해석을 수행하고 실험 결과를 도출해 보았다.

2. 본 론

2.1 피드포워드 제어의 기본 원리

피드포워드 제어 방식은 그림 1.과 같이 입력 전압의 정보를 이용하여 컨버터의 스위치를 제어하는 방식이다. 피드포워드 제어 방식의 목적은 식(1)처럼 출력 전압 Vo가 입력 전압 Vi와 상관없이 동작하고, 또 modulation 제어입력 전압 vm에 비례하여 동작하게 하기 위한 것이다.

$$V_o \approx A \cdot v_m \quad (1)$$

입력 전압이 변화하여도 출력 전압이 일정 전압으로 유지 되려면, 입력 전압이 변화함에 따라 통류율이 컨버터의 종류에 맞게 변화하여야 한다.

2.2 승강압형 컨버터의 피드포워드 제어

승강압형 컨버터에 알맞는 피드포워드 제어 회로 설계를 위해 compensation modulation 함수 g를 도입한다. 즉, g>0 이면 compensator 출력단이 1 이고, g<0 이면 compensator 출력단이 0 이다. 모든 컨버터의 입력 대 출력비는 식(2)처럼 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_i} = M(D) = \frac{P(D)}{Q(D)} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 의하여

$$V_o \cdot Q(D) = V_i \cdot P(D)$$

$$A \cdot v_m \cdot Q(D) = V_i \cdot P(D)$$

$$v_m \cdot Q(D) - \frac{1}{A} V_i \cdot P(D) = 0$$

이 때 D가 modulation 함수 g의 zero에 해당하므로 D를 t/Ts (On 시작 방식: Trailing edge) 나 1-t/Ts (Off 시작 방식: Leading edge) 로 두면 일반적인 modulation 함수 g는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{TE} = v_m \cdot Q\left(\frac{t}{T_s}\right) - \frac{1}{A} V_i \cdot P\left(\frac{t}{T_s}\right)$$

$$g_{LE} = v_m Q\left(1 - \frac{t}{T_s}\right) - \frac{V_i}{A} P\left(1 - \frac{t}{T_s}\right)$$

승강압형 컨버터에서 P(D)=D, Q(D)=1-D 이므로 modulation 함수 g에 적용시키면 식(3)과 (4)와 같이 표현된다.

$$g_{TE} = v_m \cdot \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) - \frac{1}{A} V_i \cdot \frac{t}{T_s} \quad (3)$$

$$g_{LE} = v_m \cdot \frac{t}{T_s} - \frac{1}{A} V_i \cdot \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) \quad (4)$$

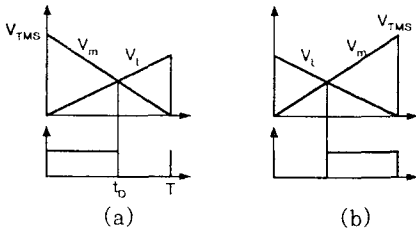


그림 2. 승강압형 컨버터에서의 (a) on 시작 방식, (b) off 시작 방식 PWM 제어 방식

On 제어 방식의 경우, 제어신호 v_m 은 역램프파가 되며, 입력전압의 정보는 램프파가 되어 compensator로 들어가서 비교된다. Off 제어 방식의 경우 반대가 된다. 이처럼 승강압형 컨버터의 피드포워드 제어 모델은 입력 전압의 정보가 램프파 또는 역램프파의 형태로 나타나기 때문에 최대 전압 변조 제어 방식(PVM)이라 한다. [2] 그림 2.에서는 식 (3)의 On 시작 방식과 (4)의 Off 시작 방식의 비교가 양단 파형들을 나타내었다.

2.3 On 시작 방식 최대 전압 변조(PVM) 제어

On 시작 방식 피드포워드 최대 전압 변조 제어 모델에서 제어신호를 받은 역램프파 함수를 $v_m(t)$, 입력 전압의 정보를 받은 램프파 함수를 $v_i(t)$ 라고 한다면, 램프파 $v_i(t)$ 는 R_c 와 C_c 로 이루어진 적분기로 간단히 구현할 수 있다. 적분기의 시정수를 τ_c 라 하면,

$$V_i(t) = V_i(1 - e^{-t/\tau_c}) \cong \frac{V_i}{\tau_c} \cdot t$$

$$D = \frac{t_D}{T} = \frac{1}{1 + \frac{k}{V_{TMS}} V_i} \quad \left(k = \frac{T}{\tau_c} \right) \quad (5)$$

또 $D = \frac{V_o}{V_i + V_o}$ 이므로 $V_{TMS} = k \cdot V_o$ 이고,

$$V_o = \frac{V_{TMS}}{k} \quad (6)$$

즉 변형된 PVM 제어 방식 승강압형 컨버터에서는 식 (6)에서처럼 출력 전압 V_o 가 입력 전압 V_i 와는 별개로 제어신호 V_{TMS} 에만 비례한다는 것을 볼 수 있다. 그리고 통류율 D 의 미소변동분을 알아내기 위해 DC 신호와 AC 신호를 분리하였다.

$$D + d = \frac{1}{1 + A \left(\frac{1}{V_i + v_i} \right)} \quad \left(A = \frac{k}{V_{TMS}} \right)$$

$$= \frac{1 + A V_i}{1 + A V_i + A v_i} \cdot \frac{1}{1 + A V_i}$$

여기서 $1 + A V_i \gg A v_i$ 이면

$$\frac{1 + A V_i}{1 + A V_i + A v_i} \cong 1 - \frac{A v_i}{1 + A V_i}$$

$$D + d = \frac{1}{1 + A V_i} - \frac{A}{(1 + A V_i)^2} v_i$$

그러므로 AC입력 대 통류율의 미소변동분은

$$\frac{d}{v_i} = - \frac{A v_i}{(1 + A V_i)^2} = - D^2 A \quad (7)$$

2.4 PVM 승강압형 컨버터의 DC 특성

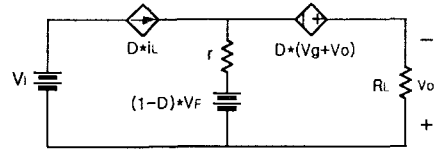


그림 3. 승강압형 컨버터의 DC 모델

그림 3.에서는 일반적인 개방루프 PWM 피드포워드 제어 방식 승강압형 컨버터의 DC 모델을 보여준다.

$$r = D r_{DS} + (1-D) R_F + r_L$$

여기서 r_{DS} 는 MOSFET의 on-저항, R_F 는 다이오드의 순방향 저항, r_L 는 인덕터의 esr이다.

이 DC 모델에서 입력 대 출력 함수를 유도하면,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D + (D-1) \frac{V_F}{V_i}}{(1-D) + \frac{r}{R} \frac{1}{1-D}} \quad (8)$$

여기에 피드포워드 PVM 제어 방식 (5)를 적용하면 입력 대 전달함수는 식 (9)처럼 된다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D - AD \frac{V_F}{V_i}}{1 - D + \frac{r}{R} \frac{1}{1-D}} \quad (9)$$

2.5 소신호 특성

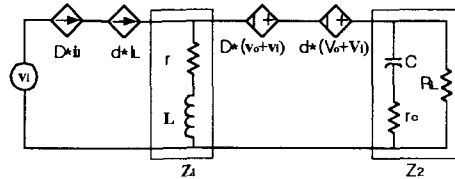


그림 4. 승강압형 컨버터의 AC 모델

승강압형 컨버터의 스위치 전류와 다이오드 양단 전압은 식(10), (11)과 같이 표현된다.

$$d_T \cdot i_L = (D + d)(I_L + i_i) \quad (10)$$

$$d_T \cdot (v_i + v_o) = (D + d)(V_i + V_o + v_i + v_o) \quad (11)$$

식 (10)과 (11)에서 분리된 AC성분 $D i_i + d I_L$, $d(V_i + V_o) + D(v_i + v_o)$ 을 이용하여 그림 4.의 일반적인 PWM 피드포워드 제어 방식 승강압형 컨버터의 소신호 모델을 구할 수 있다. 이 소신호 모델에서 입력 대 출력 전달함수를 유도하면 식 (12)가 도출된다.

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{D + \left(\frac{Z_1 V_o}{(1-D)^2 R} + V_o + V_i \right) \frac{d}{v_i}}{\frac{Z_1 Z_2}{1-D} + (1-D)} \quad (12)$$

여기에 식 (7)의 AC 입력 대 통류율의 미소변동분을 적용하면 입력 대 출력 전달함수는 식 (13)처럼 된다.

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{D^2(R + R_c)}{(D-1)R^2 R_c} \frac{(s + \omega_{zn})(s + \omega_{rl})}{s^2 + 2\zeta \omega_o s + \omega_o^2} \quad (13)$$

ω_{zn}	$\frac{1}{C(R+R_c)}$
ω_{rl}	$\frac{r}{L}$
ω_o	$\sqrt{\frac{Rr+(D-1)^2}{LCR R_c}}$
ζ	$\frac{CR R_c r + LR + C(R+R_c)(D-1)^2}{2\sqrt{LCR R_c [Rr+(D-1)^2]}}$

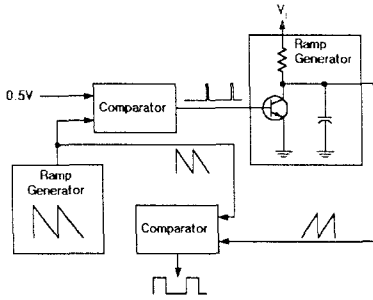


그림 5. PVM 제어기의 개략도

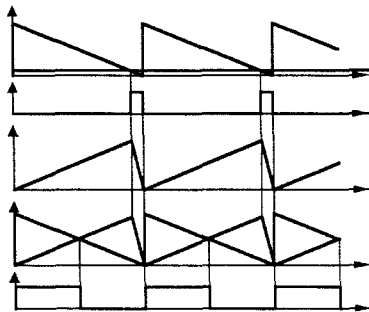
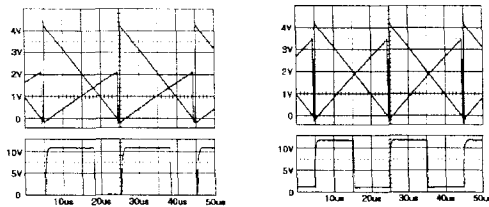
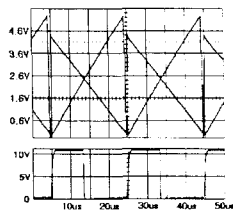


그림 6. PVM 제어기의 파형



(a)

(b)



(c)

그림 7. (a) $V_1=15V$, (b) $V_1=25V$, (c) $V_1=35V$ 일 때의 외부 입력 램프, 비교 전압, 비교기 출력단전압.

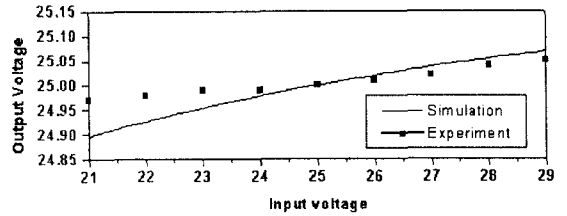
3. 실험 결과

3.1 실험 회로

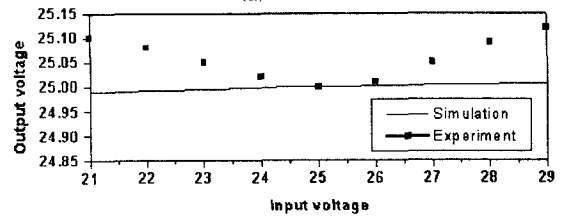
그림 5.는 승강압형 컨버터의 피드포워드 PVM 제어 방식의 제어 회로에서 제시한 제어기를 구성한 것이다. 자세한 동작 원리는 그림 6.에 나타나 있다.

3.2 DC 측정값

위의 피드포워드 PVM 제어 방식을 적용하여 승강압형 컨버터를 $V_g=25V$, $V_o \cdot nom=25V$, $R_L=25\Omega$, $V_F=0.98V$, $C=470\mu F$, $r_c=60m\Omega$, $L=625\mu H$, $r_L=0.12\Omega$, $R_F=0.22\Omega$, $\alpha=1$, $R_{DS(ON)}=0.028$, $\tau_c=1.189 \times 10^{-4} \text{ sec}$, $V_{TMS}=4.2V$ 로 구성하였다.



(a) $R=25 \text{ ohm}$



(b) $R=250 \text{ ohm}$

그림 8. DC 입력전압 대 출력전압

그림 7.은 입력 전압이 15V, 25V, 35V일 때, 제어기 내부의 비교기 양단에 나타나는 역램프파, 램프파, 그리고 이 두가지 파형이 비교되어 나온 통류율이다.

그림 8.은 부하가 25 Ω 과 250 Ω 일 때, 승강압형 컨버터의 입력전압 대 출력전압을 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 CCM에서의 변형된 피드포워드 PVM 스위치 모델을 유도하였고, 이 모델을 적용시킨 승강압형 개방 루프 컨버터의 DC특성과 동특성을 해석하였다. 피드포워드 제어 방식 PWM 승강압형 컨버터는 입력 전압의 변화에 따른 DC 전압 regulation이 우수하다. 실험에서 Line regulation이 각각 1%($R=25\text{ohm}$)와 1.7%($R=250\text{ohm}$)로 나타난다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. K. Kazimierczuk and A. Massarini, "Feedforward control of dc-dc PWM boost converter," IEEE Trans. Circuits and Systems, I, vol.44, pp.143-148, Feb.1997
- [2] L. Calderone, L. Pinola, and V. Varoli, "Optimal feed-forward compensation of PWM dc/dc converters with "linear" and "quadratic" conversion ratio," IEEE Trans. Power Electronics, vol.7, pp.349-355, April 1992.
- [3] B. Arbetter and D. Maksimovic, "Feedforward pulse width modulators for switching power converters," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 12, pp. 361-368, March 1997.